

# 災害調査報告書

## 銅合金製造工場で発生した爆発災害

(要約版)

労働安全衛生総合研究所

# 目 次

要旨	1
1. 調査の項目	1
2. 災害の概要	1
2.1 発生場所	1
2.2 被害状況	1
2.3 発生状況の概要	1
3. 調査結果	4
3.1 災害に至る経過の詳細	4
3.2 被災状況	6
3.3 電力消費量	9
4. 災害発生メカニズムの考察	1 1
4.1 亜鉛の突沸と爆発	1 1
4.2 金属の燃焼・爆発	1 2
4.3 ガス爆発	1 2
4.4 水蒸気爆発	1 3
5. 本災害のメカニズムと事故原因の推定	1 3
5.1 事故発生メカニズム	1 3
5.2 事故原因	1 3
6. 再発防止策	1 4

## 要 旨

銅合金製造工場において、高周波誘導炉を使用して銅（リサイクル品）を溶解した後、亜鉛（インゴット）を投入・溶解作業をしていたとみられる時に、誘導炉内の溶湯が噴出し、これを浴びるなどで労働者4名が死傷した。

鉄鋼業および非鉄金属製造業で多い爆発災害に、コークス粉およびコークス不完全燃焼ガス（一酸化炭素）、金属微粉末が関連する爆発や、冷却水などの水の混入による水蒸気爆発が挙げられるが、調査の結果、本件ではこれらの爆発が主要因である可能性は低かった。一方、主要な溶湯成分の銅の融点（1085℃）が、もう一つの主要成分である亜鉛の沸点（907℃）を超えていることから、亜鉛の突沸が爆発の主要因であるとの結論に至った。

### 1. 調査の項目

- (1) 爆発の原因究明（メカニズムと原因）
- (2) 再発防止対策

### 2. 災害の概要

#### 2. 1 発生場所

銅合金製造工場内の銅合金溶解用高周波るつぼ型誘導炉（以下、炉と称す）

#### 2. 2 被害状況

##### 2. 2. 1 人的被害

死亡2名 噴出した溶湯などの高温物により広範囲熱傷を負い死亡した。

軽傷2名 別の炉において作業中、高温物による火傷や煙吸引により負傷した。

##### 2. 2. 2 物的被害

炉内にあったとみられる溶湯の約2/3が半径10m内に飛散した（写真1）。

付近にあった炉の制御盤などが焼損するとともにプラスチック容器などが溶損した（写真2）。

##### 2. 3 発生状況の概要

銅合金を製造するため、高周波誘導型の炉を使用して銅（リサイクル品）を溶解した後、亜鉛（インゴット）を投入・溶解作業を行っていた時に、炉内の溶湯が噴出した。

飛散した高温物や亜鉛蒸気の吸引や接触などにより、作業員4名が死傷し、工場内設備の一部で火災となり焼損した。



写真1 溶湯の飛散状況（上：俯瞰、下：炉近傍）



写真2 高温物によるプラスチック容器の溶損

### 3. 調査結果

#### 3. 1 災害に至る経過の詳細

##### 3. 1. 1 炉の補修前の作業手順

被災した炉は、銅および亜鉛から黄銅を製造するための高周波るつぼ型誘導炉であり、仕込み量6 t（約860リットル）、耐熱温度1060℃で、大気圧での合金製造能力を有する。原料の銅は、銅線や切削屑などのリサイクル品を用い、亜鉛にはインゴットを用いていた（写真3、4）。設計当初の合金製造の作業手順は以下の通りであった。

- ・原料である銅および亜鉛を計量する。
- ・電磁誘導型の炉は規定量以上の内容物がないと正しく加熱できないため、原料が少ない場合には、製品とほぼ同じ組成の黄銅（工場内で製品最終加工の際に出た端材、切り屑など）を追加する。
- ・銅、亜鉛、黄銅を炉に入れ、蓋をする。
- ・溶解炉の加熱を開始する。
- ・溶解後、浮き上がってきた不純物（スラグ）等を除去する。
- ・溶解した合金を一部取り出し、成分を分析する。
- ・分析結果による組成が製品の許容値を外れていた場合は、不足成分を追加投入し、再び溶解手順に戻り、成分を調整する。
- ・許容値内であれば、炉を傾けて合金溶湯を成形機に移し、冷却して円柱状のインゴットとする。
- ・不純物が多い端部や円周部を切削研磨する。
- ・規程の長さに切断し製品とする。



写真3 銅材料（左：銅線、右：銅切削屑）



写真4 亜鉛材料（インゴット）

### 3. 1. 2 耐熱材の補修

炉は高温となるため耐熱材が摩耗することから、定期的に耐熱材の交換などの補修が必要である。従来は炉のメーカーに補修を依頼していたが、事故時のものは自社で部分的に補修を行ったものであった。残留水分による破損や水蒸気爆発を防ぐため、補修後に耐熱材を1週間自然乾燥させた。

### 3. 1. 3 炉の補修後の作業手順

#### (1) 第1回目

補修後、最初の溶解作業であった。この作業は、発災6日前に開始し、銅3 tと亜鉛1.6 tと黄銅1 tを炉に入れて溶解させた。補修した耐熱材を完全に乾燥させるために、溶解した合金を10時間ほど保温した。作業開始から25時間後に溶湯を次工程へ送った。

#### (2) 第2回目

第2回目の作業は、発災5日前に開始した。銅3 tと亜鉛1.6 tを最初に炉に入れ溶解した。残りの原料は、作業が順調に進んだことから予定よりも早く継ぎ足された。本作業では作業開始から17時間後に溶湯を次工程へ送った。

#### (3) 第3回目

第3回目の作業は、発災4日前に開始した。銅2 tと亜鉛0.6 tを最初に炉に入れ、その後、溶解と原料投入をゆっくり繰り返し、作業開始から17時間後に溶湯を次工程へ送った。

#### (4) 第4回目（災害発生）

第2回目と第3回目での作業では補修前と同様に湯漏れセンサーが繰り返し作動したため、検出感度を下げて対応していた。しかし、補修が不完全である可能性が考

えられた。そこで第4回目の作業では補修箇所のトラブルを避けるため、溶湯面が補修箇所まで上がらないように、夜勤での溶解作業では銅と亜鉛の一部のみを溶解することとした。すなわち作業手順を変更した。新たな作業手順では、夜勤の時間帯には銅のみ3.8 tの溶解を先に行い、一部の亜鉛を投入するものであり、残りの原料である銅、亜鉛、黄銅の追加投入と溶解作業は人手が多い昼勤の時間帯に行うものであった。しかし、センサー作動などによる作業の遅れから、夜勤での一部の亜鉛の投入は見送られ、さらなる作業手順の変更となった。そのため、事故が起きた際の作業手順は以下の通りとなっていた。

- ・原料である銅および亜鉛を計量する。
- ・電磁誘導型の炉は規定量以上内容物がないと正しく加熱出来ないため、銅を炉に入れ、蓋をする。
- ・炉の加熱を開始する。
- ・溶解確認後、保温状態にして昼勤班に引き継ぎ。
- ・亜鉛と黄銅を炉に追加投入する。（この作業中に被災したと推定される）
- ・溶解後、浮き上がってきた不純物（スラグ）等を除去する。
- ・以降は従来と同様。

### 3. 2 被災状況

#### 3. 2. 1 白煙の発生

工場敷地入り口に設置された監視カメラにより、被災当時、工場建屋から大量の白煙が吹き出していることが確認された。

#### 3. 2. 2 溶湯の飛散量の推定

図1に被災後の炉とその中に残存した合金の状況を示す。炉の上端から合金の表面までの深さは約105 cmであったことから、炉内に残留した合金の容積は約200リットルと想定された。残留物が製品と同じ組成である亜鉛33%を含む黄銅と仮定すると、製品の黄銅は比重が8.3であることから、これを乗算して残留物の質量は約1.7 tと推算される。被災時は6 tの合金（銅3 t、黄銅1.5 t、亜鉛1.5 t）を投入したとの記録から推算値を差し引くと、約4.3 tの溶湯が飛散した計算になる。

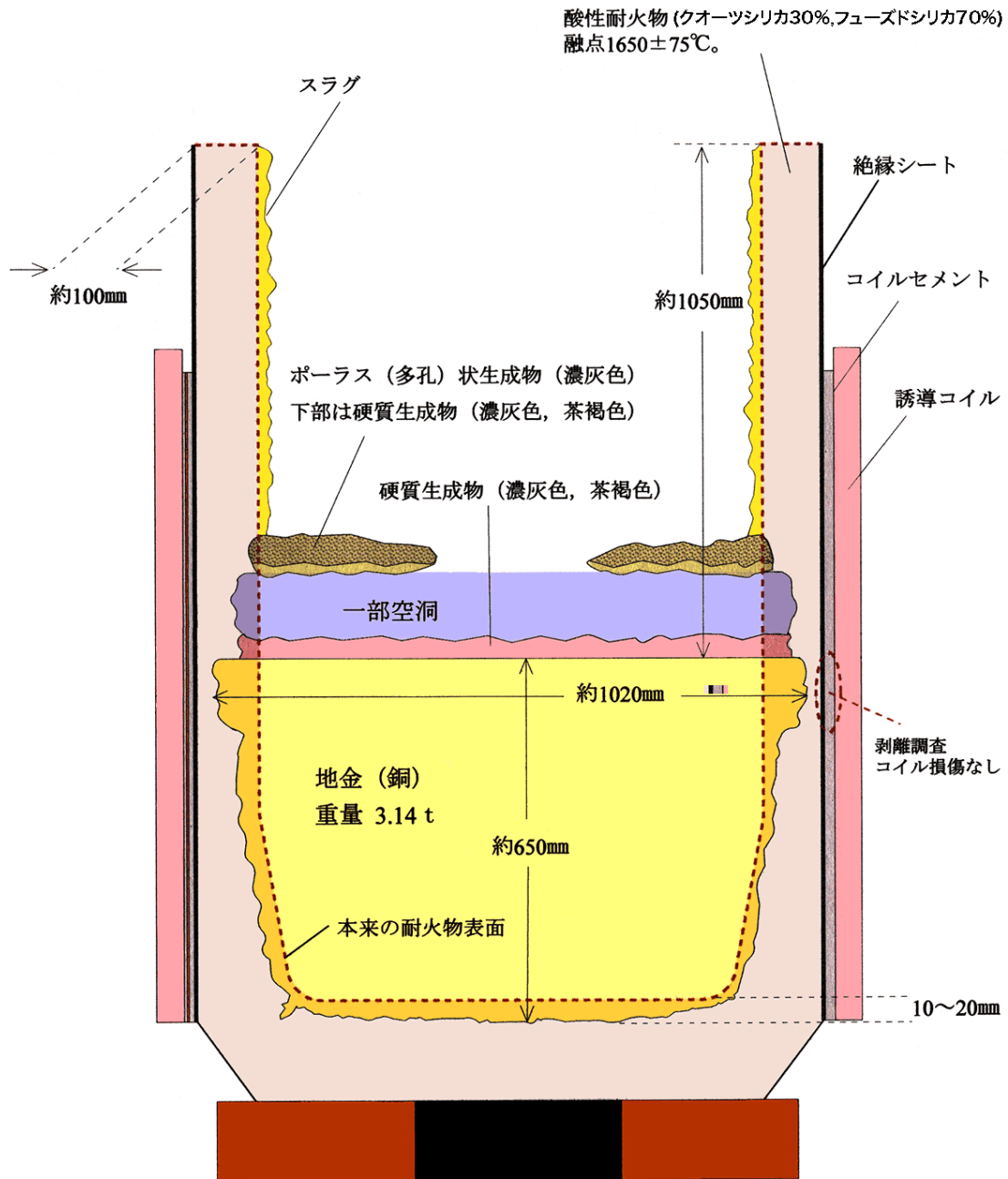
#### 3. 2. 3 飛散物の成分

金属粉末を島津社製 エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置 EDX-800HS を用いて成分分析した。エネルギー分散型蛍光 X 線分析では、原理上ホウ素より重い元素の存在比率を検出できる。サンプルは、不均一であったため、サンプル表面の色が異なる数点を計測し、下表にその範囲を示した。また、土などの混入によると推定さ



れるケイ素の影響を排除するため、銅と亜鉛の合計に対する亜鉛の割合も求めた。

元素分析結果（表1）から、炉内残留物および炉の近傍の飛散物は銅と亜鉛を主体とする合金であったが、炉から遠い飛散物の主成分は亜鉛であった。このため、爆発は亜鉛を投入した後で、十分混合する前であったことが分かった。



(警察作成の資料を改変)

図1 炉の固化溶湯残留状況

表1 各金属元素の割合(%)

元素	炉内残留物 1	炉内残留物 2	炉外飛散物
銅	18.1 - 45.5	22.4 - 52.6	26.9 - 33.2
亜鉛	53.9 - 69.7	26.2 - 38.5	66.0 - 69.5
ケイ素	0.0 - 11.8	6.4 - 29.4	痕跡無
硫黄	0.0 - 7.0	2.5 - 22.1	0.0 - 1.3
リン	0.0 - 7.6	痕跡無	0.0 - 2.3
1%未満の 微量成分	カルシウム マンガン		
銅と亜鉛の 合計に対する 亜鉛の比	54.2 - 78.7	42.3 - 53.9	66.5 - 72.1

### 3. 2. 4 予熱用ガスバーナー

ガスの漏洩によるガス爆発の可能性を検討するため、炉の製品取り出し口に設置された、溶湯の凝固を防止するための予熱用と思われるガスバーナーの調査を行った(写真5)。このバーナーは被災した炉から離れた場所に設置されており、仮に未燃のガスが漏洩したとしても、ガス爆発の特性から、溶湯が飛散したという被災状況と同じ状況を生じることは難しい。すなわち、本災害の主要因である可能性は低い。



写真5 予熱用ガスバーナー

### 3. 2. 5 水冷装置の漏水

水と溶湯の接触による水蒸気爆発の可能性を検討するため、炉に設置された、誘導コイル保護用の水冷装置の調査を行った。被災後、固化した金属を除去して炉の内壁を露出させ、水密検査（水冷装置を水の出入口を塞いだ状態で加圧した水により満たした後、静置することにより、圧力変化の有無によって漏水を判別する検査）を行った結果、漏水は認められなかった。この結果から、炉内への漏水による水蒸気爆発の可能性は低いことが明らかになった。

## 3. 3 電力消費量

### 3. 3. 1 電力消費量の推定

使用機器の消費電力は、被災した炉と隣接した炉の消費電力の合計値が10分ごとに記録されていた。被災した炉の詳細な消費電力の調整履歴は日誌に記載していたとのことであるが、同日誌は焼失したため、明らかではない。そこで、上記の2つの炉の消費電力の合計値から、隣接した炉の消費電力を差し引く方法で被災した炉の消費電力の推算を試みた。

隣接した炉の電力調整はタップを切り換えることによって行うが、実際に使用しているタップは3段階のみであった。具体的には80 kW、210 kW、550～600 kWであるという。隣接した炉の日誌に記載された作業内容により3つのタップのうちのいずれを使用したかを推測し、その電力を隣接した炉の電力とした。なお、実際には炉の状態によって、隣接した炉の消費電力は多少上下するはずであるが、それは無視し一定であるとみなした。

2炉の消費電力の合計から隣接した炉の消費電力を差し引いて求めた被災した炉の消費電力を時間で積算して、第1回目～第4回目の作業開始からの累積消費電力（電力消費量）を求めた（図2）。

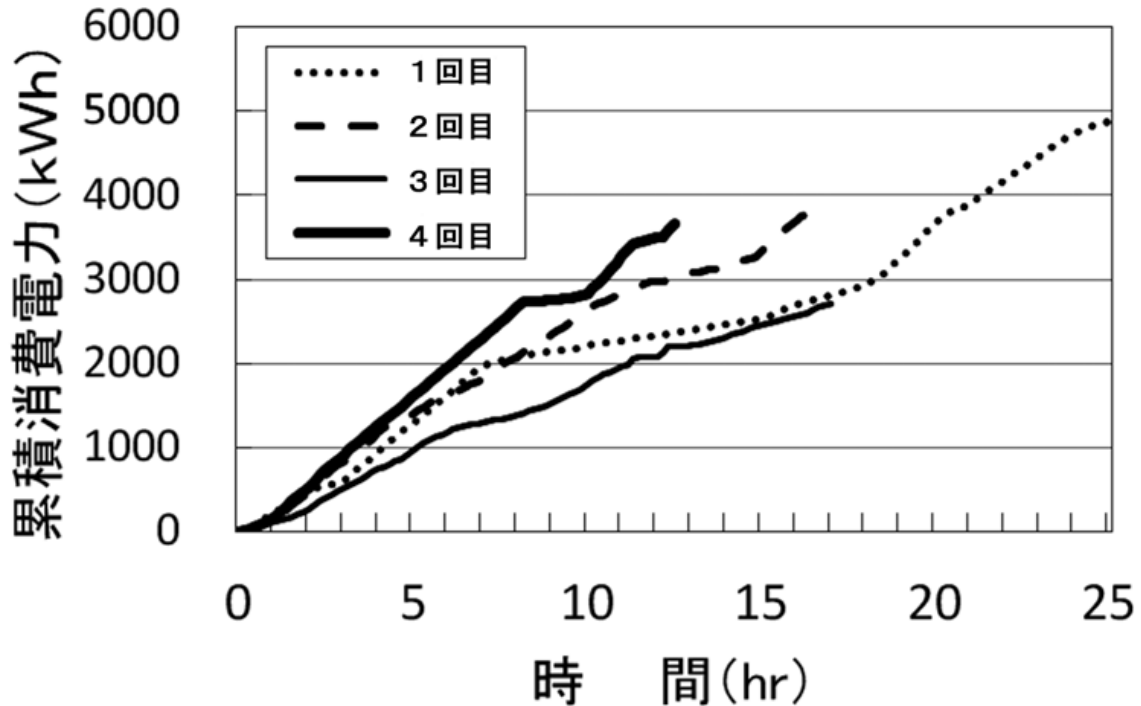


図2 炉の補修後の各回の累積消費電力

### 3. 3. 2 被災直前の消費電力の経過 (図2)

被災した炉の第4回目の消費電力の推算値は、作業開始から約8時間350～400kWを保持した後、いったん保温状態の50～100kWに落ちていた。約2時間経過後、追加投入した原料の溶解を進めるために約2時間400～500kWに消費電力を上げてから再び保温状態の約100kWに戻っていた。そして、さらに約1時間後に原料を追加して消費電力を上げたとみられ、その十数分後に爆発が起きている。

### 3. 3. 3 溶解炉の補修以降、4回の溶解作業での累積消費電力 (図2)

第1回目の溶解作業では、補修した溶解炉の耐火材を完全に乾燥させるために作業開始7時間後からは保温状態を10時間ほど続けた。結果、溶湯が排出されたのは、作業開始から25時間後であり、それまでの累積消費電力は4875kWhに達している。保温状態では、炉内の溶湯の量とその温度によって消費電力は変化するが、おおよそ90kW程度を要すると仮定すると、4875kWhのうち2250kWhは保温用であるから、加熱用に消費された電力は2625kWh程度と推算される。

第2回目では、17時間で3842kWhを消費し、保温用電力を差し引いた加熱用電力量は2312kWh程度と推算される。

第3回目では、17時間で2705kWhを消費し、保温用電力を差し引いた加熱用電力量は1175kWh程度と推算される。

第4回目では、12.5時間で3662kWhを消費し、保温用電力を差し引いた加熱用電力量は2537kWh程度となる。

これらを比較すると、第4回目は、予定の原料の投入を終えていない段階で、加熱用電力が第2回目よりも225kWh、3回目よりも1362kWh多い。また、第1回目では25時間かけた同水準の電力量に、12.5時間という短時間の加熱で達している。第3回目終了から第4回目開始まで約2日時間が空いていたために冷えていたことも考えられるが、このことを考慮しても、これらの比較結果は、第4回目の加熱に使用された電力量が、第1回目から第3回目よりもかなり多くなっていると言える。

ところで、亜鉛、亜鉛量35%の銅合金、銅を別々に室温から1200℃付近まで加熱すると、まず亜鉛が融解し（融点419.5℃）、次に銅合金が融解（融点902℃）、亜鉛が沸騰（沸点907℃）、銅が融解（融点1085℃）と続く。したがって、銅が融解する温度では亜鉛は気化する。また、材料の投入や沸騰などの攪はん効果により空気と溶湯が接触していれば、上記の条件の加熱では亜鉛（発火点460℃）、銅合金（発火点1025℃）の順で発火する。すなわち亜鉛の含有率が大きいほど低温で発火する。ただし、発火点は空気の供給や放熱などの環境条件で変動するため、発火点を超えて加熱しても、すぐに発火するとは限らない。

炉の補修前および補修後の第1回目から第3回目には発火したという情報がないことから、

- (1) 溶湯（銅合金）の温度は1025℃を超えていなかった。
- (2) 1025℃を超えていたが、亜鉛量が35%を下回る製品の製造であって、発火温度が溶湯の温度よりも高かった。
- (3) 亜鉛量が35%の製品であって1025℃を超えていたが、金属蒸気の遮蔽効果や発火遅れにより、発火が起きる前に作業が終わり温度が下がった。

のいずれかであったことになる。

一方、事故が起きた4回目では昼勤の作業が始まるまでは銅のみの溶湯であった。銅の融点は1085℃であることから、この温度を超えていたことは確実であり、1085℃を大きく超えていた可能性も十分考えられる。

#### 4. 災害発生メカニズムの考察

被災状況から「溶湯の多くを飛散させる威力」であったこと、「白煙が大量発生」したことの2点に着目して、溶解炉で発生しうる爆発シナリオを検討する。

##### 4.1 亜鉛の突沸

主たる原因である可能性が最も高い。

材料の銅の融点1085℃はもう一つの材料である亜鉛の沸点907℃より高い。したがって、投入量や投入速度にもよるが、溶けた銅の中に亜鉛を投入すれば、突沸

(爆発的蒸発) が起きる (参考文献 1)。

作業員の証言では、溶けた銅の上に固体の銅または黄銅を載せ、その上に亜鉛を置く手順で亜鉛を投入していたとのことである。しかしながら耐火服などの防護無しに、手作業で亜鉛を静かに 1085℃以上の溶湯へ投入することができたかどうかは疑問である。また、溶湯に浮遊する溶けていない固体の銅または黄銅の上に亜鉛を投入することにより亜鉛と溶湯の接触を避け、亜鉛の急激な加熱を防いでいたとのことであるが、溶湯に浮遊した固体の断熱効果の有効性については確認されていなかった。

つまり、「溶湯が 1085℃を大幅に超えて加熱されていた」、「亜鉛の投入の勢いが強すぎた」、「溶解亜鉛と溶解銅を急激に攪拌した」のうちの 1つ以上の状況で亜鉛が投入されれば、突沸を起こし、溶湯を飛散させながら亜鉛蒸気を噴出すると考えられる。

発生した亜鉛蒸気の燃焼については次節で議論する。

#### 4. 2 亜鉛や黄銅の燃焼・爆発

直接の原因である可能性は低いが、副次的に発生した可能性は高い。

黄銅は亜鉛量が多くなるほど燃焼しやすく、亜鉛量 20%では 1225℃、亜鉛量 35%では 1025℃以上で燃焼が始まる (参考文献 2)。また、微細化 (ガス化/飛沫化/粉末化) し空気と混合した亜鉛や黄銅は (ガス/ミスト/粉じん) 爆発を引き起こし、微細化した固体の酸化物を生じる。空気が十分にある条件下では、銅は黒色の酸化銅 (II) に、亜鉛は白色の酸化亜鉛になる。

被災当時、銅や亜鉛、黄銅の原料および溶湯は塊の状態であったので、この状態の金属と空気中の酸素との反応である燃焼は拡散燃焼であり、火災になることはあっても爆発になることはまず考えられない。

しかし、被災当時、大量の白煙が生じたことが確認されていることから亜鉛蒸気や亜鉛微粉末が爆発・火災を起こしたと考えられる。したがって、この爆発・火災の前に亜鉛蒸気や亜鉛微粉末を噴出させる現象 (前節「亜鉛の突沸」) が発生したと推定される。

#### 4. 3 ガス爆発

直接の原因である可能性は低い。

被災現場で確認されたガスバーナーの他、炉内を還元雰囲気にするために用いるコークスから生成する一酸化炭素など、当該誘導炉では可燃性ガスが存在しており、これらの可燃性ガスが漏洩し、爆発・火災を引き起こす可能性がある。

しかし、本災害での作業では、コークスなどの可燃物を用いておらず、ガスバーナーも当該炉から離れた場所に設置されていた。また、ガス爆発の場合、ガスは溶湯より軽いため、爆発・火災は溶湯の上方で発生することになり、上部にある炉蓋が飛散

することはあっても、下方にある溶湯の大部分は炉内に残るはずである。このことは被災状況の調査結果と一致せず、ガス爆発が主たる原因である可能性は低い。

ただし、他の要因により発生した爆発・火災によって副次的にガス爆発が発生したことは否定できない。

#### 4. 4 水蒸気爆発

発生した可能性はきわめて低い。

高温の溶解した金属と水などの液体の接触は、水などの急激な蒸発による気化膨張、すなわち水蒸気爆発を引き起こすことがある。特に、水などの液体が封じ込められている容器が金属溶湯の中に投入されると、爆発の威力が増す。リサイクルされた金属原料の中には、水などの液体が入った容器や雨水が混入する場合がある。

また、一般的な溶解炉には、炉および付帯設備を高温から守るため、冷却水が用いられており、もしもこの冷却水が漏れて金属溶湯と接触すると、水蒸気爆発を引き起こす。

本災害では、銅の原料にリサイクル品を用いているが、溶解前の原料は銅線や切削屑などが主であり、容器やパイプ状の物はなかったため（写真3左）、リサイクル材料金属に水などの液体が入った容器が混入していた可能性は低い。

また、本災害は銅を融解し終えてから数時間後の災害であるため、リサイクル材料に含まれていた水などの液体が被災時まで残留していた可能性もきわめて低い。

さらに、当該炉はコイル部分を水で冷却していたが、被災後に炉内壁を露出させ、水密検査を行った結果、冷却水の漏れは認められなかったことから、漏水による水蒸気爆発の可能性もきわめて低いと考えられる。

### 5. 本災害のメカニズムと事故原因の推定

#### 5. 1 事故発生メカニズム

溶解した高温の銅（融点1085℃）の中に低沸点の亜鉛（沸点907℃）を投入したため、突沸（爆発的蒸発）が起き、高温の溶湯が飛散した。さらに発生した亜鉛蒸気が爆燃もしくは燃焼し、大量の白煙を生じたと考えられる。

#### 5. 2 事故原因

- ・ 高温の銅溶湯の中に低沸点の亜鉛を投入する誤った手順で作業を行ったことが爆発の直接原因である。
- ・ 作業手順の変更にあたり安全性の検討がなされなかったことが間接原因である。

当該炉の補修前は、低温時に銅と亜鉛を混合し、空気中の酸素を遮断しつつ徐々に溶解・混合をしていたが、事故が起きた際は、補修箇所のトラブルを避けようと溶湯面が補修箇所まで上がらないように、夜勤での作業ではすべての原料を溶解せず、一

部を昼勤で溶解することにした。

ところが、その「夜勤ですべての原料を溶解しない」の具体的な作業内容の変更を明確に定めず、その作業変更に伴う安全性の検討もなされなかった結果、黄銅精練における基本的な危険性といえる過加熱による亜鉛の突沸および亜鉛蒸気の発生が見過ごされた。

そして、事故が起きた際は、亜鉛の投入が昼勤まで先延ばしされたため、先に入れた銅が完全に溶解した後に亜鉛を投入する手順となり、亜鉛の突沸を引き起こすことになった。

## 6. 再発防止策

本災害は銅合金の製造時における亜鉛の突沸の危険性が正しく評価されていなかったために発生した可能性が高いと考えられる。そこで、同種災害を防止するためには、次の対策が挙げられる。

### ア 高温の溶湯に亜鉛を投入しない

亜鉛の沸点907℃を超えている溶湯に亜鉛を投入することは、亜鉛の突沸、亜鉛蒸気の大量発生を引き起こすだけでなく、亜鉛の酸化による品質低下も引き起こす。このため、亜鉛の投入は亜鉛の沸点以下の時に行う。

また、現在の温度を掌握するために温度計測を常時またはその都度行う。

### イ 亜鉛溶解時には炉蓋を用いる

亜鉛を含む合金の製造時において、亜鉛の沸点以上の加熱が必要となる場合には必ず炉蓋を用い、万一の突沸による飛沫の飛散や空気との接触による亜鉛の燃焼を防ぐ。

### ウ 作業時には耐火防護服を使用する

加熱後の作業は遠隔で行うことが望ましいが、止むを得ず加熱している炉に接近する際には、耐火防護服を使用し、突発的な突沸や火災で被災しないよう十分な防護策を取る。

### エ リスクアセスメントを実施する

製造工程の変更を行う際には、製造部門だけでなく、技術部門や研究部門とともに、必要に応じて専門家の助力を得つつ、変更後の当該製造工程について、リスクアセスメントを実施する。

## 参考文献

- 1) 濱住松二郎, 非鉄金属および合金 4版, 内田老鶴圃, p. 49(1992)
- 2) 大澤直, 図解入門 よくわかる 最新「銅」の基本と仕組み, 秀和システム, p. 111(2010)